



Trabajo Fin de Grado

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE PROCESADO DE
MATERIALES COMPUESTOS DE BASE POLIMÉRICA
INYECTADOS EN SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO

INFLUENCE OF PROCESSING CONDITIONS IN POLYMERIC
BASED COMPOSITE MATERIALS ON MECHANICAL
BEHAVIOUR

Autor

Fernando Ruiz Huguet

Directores

Isabel Clavería Ambroj

Manuel Muniesa Burillo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Año 2016

RESUMEN

En estos últimos años el uso de materiales compuestos en la industria ha sufrido una gran expansión debido al amplio abanico de características que nos ofrecen. Estos materiales, como es lógico, también han llegado a la industria automovilística, permitiéndonos aligerar los componentes y conseguir rendimientos mayores.

Para el diseño de estos componentes es necesaria la realización de un análisis mecánico-estructural del componente, pero al trabajar con materiales compuestos se debe tener en cuenta que estos materiales son anisótropos, es decir, sus propiedades finales vendrán determinadas por la posición de sus fibras en el material.

La posición y orientación de las fibras viene determinada tras la fabricación del componente, lo que significa que éste puede tener una gran relevancia en su comportamiento mecánico. Es por ello que estudiaremos la existencia o no de esta posible influencia y así poder predecir errores futuros.

CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo y alcance.....	1
1.2. Estado del arte.....	2
2. Metodología.....	3
2.1. Generación de nuestro modelo en ABAQUS.....	3
2.2. Análisis reológico con MOLDFLOW.....	4
2.3. Definición del material.....	4
2.4. Mapeado de las mallas.....	5
2.5. Análisis integrado en ABAQUS.....	6
3. Aplicación de la Metodología.....	7
3.1. Explicación del caso.....	7
3.2. Resultados del proceso de fabricación.....	10
3.3. Resultados del análisis mecánico.....	15
4. Conclusiones.....	21
5. Futuras líneas de trabajo.....	22
6. Bibliografía.....	23

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Relación material-proceso-comportamiento mecánico.....	5
Figura 2 Metodología propuesta para el diseño mecánico de componentes teniendo en cuenta el proceso de fabricación en materiales compuestos.....	6
Figura 3 Propiedades mecánicas de la matriz, del refuerzo y del material compuesto obtenido a partir de ambos.....	7
Figura 4 Configuración de una entrada de material en la pieza.....	8
Figura 5 Configuración de tres entradas de material en la pieza.....	8
Figura 6 Evolución de la presión de compactación frente al tiempo.....	8
Figura 7 Fuerzas de presión y condiciones de contorno aplicadas a la pieza.....	15
Figura 8 Distribución de los resultados en tensiones y desplazamientos.....	16
Figura 9 Distribución de tensiones con un valor límite de 20MPa.....	17
Figura 10 Distribución de tensiones con un valor límite de 2MPa.....	18

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas y del proceso de fabricación de cada uno de los materiales.....	9
Tabla 2 Resultados del proceso de fabricación.....	11
Tabla 3 Resultados de la orientación de la fibra.....	13
Tabla 4 Resultados de los desplazamientos en el análisis mecánico.....	19

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo es el de estudiar el diseño de componentes de plástico por inyección para integrar en el análisis mecánico las acciones que sobre éste ejerce tanto el proceso de fabricación, como el material, como las condiciones de trabajo cuando se trabaja con materiales compuestos.

En concreto se integra en el análisis mecánico-estructural el tensor de orientación del refuerzo de un material compuesto. El tensor de orientación es una matriz simétrica que incluye en cada uno de sus elementos el grado de orientación de la fibra en las distintas direcciones.

Para realizar este análisis existen numerosos programas informáticos que hacen esta tarea mucho más sencilla. Nosotros trabajaremos con tres de ellos: MOLDFLOW, ABAQUS y DIGIMAT. Estos programas obtendrán los resultados del análisis mecánico-estructural de nuestra pieza de plástico inyectada.

El primero de ellos nos permite abordar el análisis del componente teniendo en cuenta el proceso de fabricación. Solamente tenemos que introducir como datos de entrada la geometría, las propiedades y los parámetros del proceso y nos proporcionará varios resultados tales como las temperaturas, presiones o tiempo de llenado, y el tensor de orientación del refuerzo del material polimérico empleado. Este programa también se utiliza mayoritariamente para diseñar los canales de alimentación y circuitos de refrigeración, pero al ser la geometría de nuestra pieza de tan pequeñas dimensiones, no es necesaria su utilización.

Con el programa ABAQUS realizaremos en análisis mecánico propiamente dicho. Podemos dibujar la geometría de nuestra pieza y aplicarle las cargas y condiciones de contorno que posea nuestro componente. La salida del programa serán las tensiones y deformaciones sufridas por éste, lo que nos ayudará a predecir y solucionar posibles fallos mecánicos en las piezas.

Por último, DIGIMAT permite la modelización de los materiales dependiendo de la microestructura que éste posea. Es un programa de gran ayuda a la hora de definir materiales compuestos, incorporando caracterizaciones experimentales y los resultados obtenidos de otros programas de simulación. Así, se puede ahorrar tiempo y dinero en la fabricación de componentes.

En la definición del material se tiene en cuenta la transformación que sufre éste durante el proceso de fabricación. Esto lo hacemos gracias a MOLDFLOW, el cual nos dará una serie de características particularizadas tras la inyección del plástico en la pieza.

Nuestro campo de estudio será el de la fabricación, a partir de un material compuesto, de una pieza del turbo del motor de un automóvil. Estas piezas pueden ser fabricadas

en metal o, como en nuestro caso, ser piezas de plástico. Cuando estas piezas son de plástico la forma más común de fabricarlas es por inyección, el cual es un proceso semicontinuo que consiste en inyectar un polímero en estado fundido en un molde cerrado a presión y frío, a través de un pequeño orificio.

Como se ha mencionado antes, utilizaremos un material compuesto en la fabricación de la pieza. Estos materiales se forman por la unión de dos materiales distintos para conseguir propiedades que no son posibles obtener con los originales.

Tras la realización de este trabajo seremos capaces de ver cómo influye el proceso de fabricación y la elección de material a nuestra pieza, y así poder mejorar tanto la funcionalidad de ésta como la de todo el conjunto a la que pertenece.

1.2. Estado del arte

La finalidad de este trabajo no es más que estudiar la viabilidad o no de la fabricación de una de las partes del turbo de un motor de un automóvil a partir de materiales compuestos y ver cómo influye el proceso de fabricación en su funcionamiento. En el *Anexo IV* se encuentra recogida toda la información relacionada con estos componentes.

Históricamente los turbocompresores se han fabricado de materiales metálicos debido a las condiciones de altas temperaturas y presiones que tienen que soportar. Los metales tenían altos puntos de fusión y eran más resistentes que los plásticos, que no cumplían ninguna de las restricciones impuestas. Fue la incipiente búsqueda de vehículos más ligeros lo que hizo que los fabricantes de componentes automovilísticos empezasen a experimentar con otros materiales. Todo esto coincidió con un gran avance en la industria de los plásticos, donde se empezó a utilizar los llamados materiales compuestos plásticos. Estos materiales, siendo una mezcla de dos materiales, poseían características muy superiores a cada uno de ellos por separado por lo que se comenzó a fabricar diferentes componentes que antes solo eran posibles de fabricar a partir del metal. Todo esto fue lo que condicionó la entrada de los materiales reforzados con fibras de otros materiales en la fabricación de piezas para turbocompresores.

Este tipo de piezas, al estar compuestas por materiales plásticos, el método más común de fabricarlas es la inyección. Pero este método tiene que cumplir una serie de especificaciones y de condiciones que determinaran el comportamiento mecánico de la pieza final. Es aquí donde se ubica nuestro proyecto. Nuestro objetivo será el de demostrar y comparar los diferentes modelos para la fabricación de estas piezas y así determinar si su correcto funcionamiento depende del proceso de fabricación o no.

2. METODOLOGÍA

Antes de todo destacar que la metodología de trabajo que se va a aplicar fue presentada en el II Simposio Internacional CEA de Modelado y Simulación en la Universidad de la Rioja en el año 2015.

Se pretende integrar la orientación de la fibra de un material compuesto, obtenida tras el proceso de fabricación por inyección, en el análisis mecánico-estructural mediante un software informático, de manera que se pueda utilizar este material particularizado en los análisis mecánico-estructurales. Una vez descrita la metodología se aplicará a un componente de automóvil y se evaluarán resultados de tensiones y desplazamientos con y sin la aplicación de esta metodología.

La metodología puede resumirse en las siguientes fases:

- I. Generación de nuestro modelo en ABAQUS.
- II. Análisis reológico con el programa MOLDFLOW y extracción de los resultados.
- III. Definición del material particularizado siguiendo los resultados experimentales de MOLDFLOW en DIGIMAT.
- IV. Mapeado de la malla de elementos finitos generada en MOLDFLOW y de la generada en ABAQUS a partir del programa DIGIMAT. Se pretende asignar a la malla de ABAQUS las propiedades del material que estamos utilizando e incluir en ella los resultados de MOLDFLOW.
- V. Análisis en ABAQUS de la nueva malla con toda la información de los apartados anteriores incluida en ella.

2.1. Generación de nuestro modelo en ABAQUS

El ejercicio comienza con la creación de un modelo FEM gracias a la herramienta ABAQUS. Este programa genera un fichero de extensión .inp, el cual contiene toda la información relativa a la geometría de la pieza, las cargas que actúan sobre ella, sus condiciones de contorno y los datos referentes al material de trabajo. En nuestro caso el diseño del componente no será necesario ya que hemos tomado la geometría de la pieza de un archivo ya existente, pero sí el aplicar las cargas, condiciones de contorno y mallar el modelo. Tanto las condiciones de contorno como las cargas dependerán de cual sean las condiciones de trabajo de la pieza y donde se encuentre situada. En este caso, el tratarse de una parte del turbo del motor de un automóvil, la pieza se verá sometida a incrementos de temperatura y fuerzas de presión en su parte interior.

2.2. Análisis reológico con MOLDFLOW

MOLDFLOW genera un fichero de extensión .mpi del análisis a partir de la entrada de tres tipos de entrada de datos. El primer tipo contiene tanto la geometría de la pieza como la de los canales de alimentación y sistema de refrigeración. El segundo engloba todos los datos referentes al material, extraído de la base de datos del programa la cual integra una gran cantidad de materiales de referencia. Y el último tipo de datos hace referencia a las condiciones del proceso de la fase de llenado, compactación como de la de refrigeración. Las propiedades de dentro de este último tipo de entrada de datos serán elegidas teniendo en cuenta las condiciones en las que se vaya a fabricar la pieza y atendiendo a las recomendaciones para cada uno de los materiales.

Para poder proceder a la ejecución el análisis es necesario realizar el mallado de la pieza.

Los resultados del proceso de análisis reológico pueden estar relacionados con la factibilidad de éste mismo, el control del proceso, la calidad de la pieza y su comportamiento mecánico. Estos resultados son almacenados en un fichero con extensión .xml, de forma que cuando queremos verlos son volcados sobre la malla del modelo. De esta forma es posible visualizar los resultados uno a uno en cualquier instante del proceso de inyección.

Nosotros nos centraremos principalmente en la obtención de los resultados relacionados con la orientación de la fibra después del proceso de inyección para estudiar qué es lo que ocurre tras utilizar un material cargado en el diseño del componente. Con esta información relativa a la fibra, más todos los demás resultados explicados antes, podremos definir el material en DIGIMAT volcando toda esta información de MOLDFLOW correspondiente.

2.3. Definición del material

El programa DIGIMAT es un módulo para la definición de materiales compuestos el cual incorpora resultados de otros programas de simulación. Así se consigue una mayor precisión y un encadenamiento entre el proceso de fabricación y el análisis estructural. En la siguiente figura se muestra la interdependencia entre el proceso, el material, y la respuesta del componente bajo sus condiciones de carga.

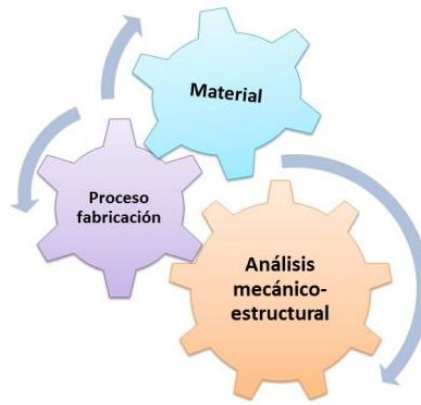


Figura 1. Relación material-proceso-comportamiento mecánico

Los plásticos compuestos reforzados con fibras no son isótropos sino anisótropos, es decir, poseen propiedades mecánicas diferentes según sea la orientación de la fibra dentro del material. El programa DIGIMAT posee una base de datos de materiales de referencia con propiedades estándar, con lo que las propiedades asociadas a la presencia de fibra no están incluidas.

Lo que hay que realizar en DIGIMAT para particularizar el material plástico es seleccionar uno de los materiales de referencia de la base de datos del programa, para volcar sobre él todos los datos y propiedades obtenidas en MOLDFLOW relacionadas a la caracterización de éste. Dentro de estas propiedades, la que más nos interesa es el tensor de orientación de fibra en cada elemento de la malla.

Tras la caracterización del material podremos tener en cuenta aspectos como la anisotropía del material o su comportamiento térmico y viscoelástico. Toda esta información se recoge en un fichero de extensión .mat.

2.4. Mapeado de las mallas

En esta fase debemos trasladar a la malla de ABAQUS los resultados obtenidos en MOLDFLOW correspondientes a la orientación de la fibra y las características del material modificado a partir del material de referencia de la base de datos.

Esta información es transferida superponiendo la malla creada en ABAQUS con la creada en MOLDFLOW. El programa encargado de la realización de esta fase es DIGIMAT, el cual mapea ambas mallas para relacionar la información relativa a la orientación de las fibras de la malla de MOLDFLOW a los elementos de la malla de ABAQUS. Para ello la posición y orientación de ambas mallas respecto al sistema de coordenadas debe ser la misma, sino el programa no podrá realizar correctamente la operación. La salida del proceso se guarda en un fichero .dof, el cual tendremos que utilizar posteriormente en el análisis de ABAQUS.

2.5. Análisis integrado en ABAQUS

Para finalizar se introduce en el fichero original de ABAQUS la información correspondiente a la orientación de fibra y a la particularización del material. A través del modelo .inp de ABAQUS abrimos el fichero .mat generado por DIGIMAT que contiene la información del material, que a su vez contiene una llamada al fichero .dof creado anteriormente en MOLDFLOW. Este último fichero alberga la información relativa a la orientación de la fibra en cada elemento de la malla de ABAQUS. Sobre esta malla es donde se realizarán los análisis mecánico-estructurales correspondientes. No quedará más que comprobar los resultados del análisis.



Figura 2. Metodología propuesta para el diseño mecánico de componentes teniendo en cuenta el proceso de fabricación en materiales compuestos

3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este apartado se va a explicar más detenidamente cómo se ha aplicado la metodología de trabajo expuesta anteriormente al componente objeto de estudio.

3.1. Explicación del caso

Tal y como enuncia el título de nuestro proyecto, nos centraremos en ver cómo afecta la variación de algunos parámetros del proceso de inyección en el comportamiento mecánico de una determinada pieza. Con anterioridad se ha mencionado que se trata de una de las partes del turbo del motor de un coche, con lo que el análisis mecánico será determinante y de gran ayuda para poder asegurar el correcto funcionamiento de la pieza y así evitar posibles errores durante la fabricación que puedan dar lugar a fallos o accidentes.

Como se menciona en el *Anexo IV* de este trabajo, cada vez es más común el uso de materiales compuestos para la fabricación de este tipo de piezas automovilísticas. Estos materiales están formados por dos o más componentes y se caracterizan porque las propiedades mecánicas del material final son superiores a las que tienen los materiales constituyentes por separado, tal y como muestra la *Figura 3*. Los materiales compuestos están formados por dos fases; una continua denominada matriz y otra dispersa denominada refuerzo.

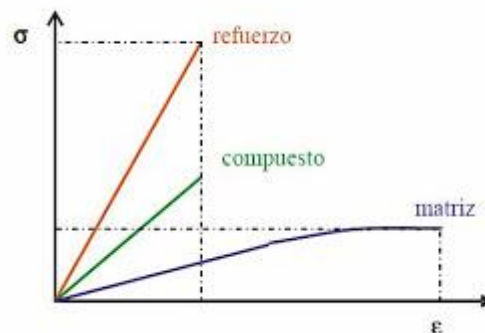


Figura 3. Propiedades mecánicas de la matriz, del refuerzo y del material compuesto obtenido a partir de ambos

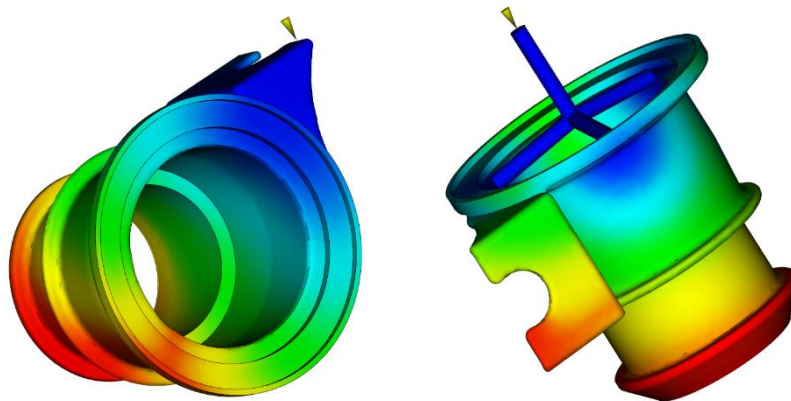
En nuestro caso será utilizado un material compuesto con matriz de poliamida o polipropileno y un refuerzo de fibra de vidrio, y el proceso a seguir más utilizado para la fabricación de turbocompresores de plástico para motores es la inyección.

Los parámetros que modificaremos dentro del proceso de inyección son el número de entradas del material, el porcentaje de fibra y el propio material de trabajo. Esto nos dará la oportunidad de observar las características más destacables del proceso de inyección como son la temperatura en el frente de flujo, la presión de inyección, la

fuerza de cierre y la orientación de la fibra en el material. Algunas de estas características deberán ser controladas para evitar errores de fabricación:

- La temperatura en el frente de flujo debería de estar siempre entre los valores recomendados por el fabricante del material y su variación no tendría ser muy elevada ya que eso podría dar lugar a un enfriamiento de la pieza no uniforme.
- La presión de inyección también debería encontrarse entre unos valores recomendados, aunque al tratarse de una pieza pequeña no hay riesgo de que ésta aumente considerablemente.
- Las máquinas actuales utilizadas para la inyección soportan hasta fuerzas de cierre de unas 8000 toneladas, con lo que esta característica no es preocupante al estar los valores de nuestro estudio muy por debajo.
- Con la orientación de la fibra ocurre lo siguiente: las propiedades mecánicas del producto varían, mejorándolas si el esfuerzo se aplica en la dirección de la fibra formada por el proceso y empeorándolas si se aplica en dirección perpendicular.

Con respecto al número de entradas del material, estudiaremos la influencia de inyectar el material mediante una única entrada (*imagen izquierda*) o, si por el contrario, es mejor el uso de varias entradas de material, siendo este número igual a tres en nuestro caso (*imagen derecha*). Ambas distribuciones se pueden ver en la *Figuras 4 y 5*:



Figuras 4 y 5. Configuración de una (izquierda) y de tres entradas (derecha) de material en la pieza

Los materiales utilizados en el estudio han sido el polipropileno y la poliamida. Para ambos materiales se ha variado su porcentaje de fibra observando dos valores: 20% y 50%. Este cambio en el porcentaje de fibra provocará que las propiedades de ambos

materiales se vean afectadas también, ya que el número de fibras de refuerzo en la pieza será diferente. Un mayor número de fibras originará que el material posea características más similares al material de refuerzo, lo que habitualmente es sinónimo de una mayor resistencia mecánica.

Para cada uno de los diferentes materiales las condiciones del proceso de fabricación también son diferentes, ya que dependen de las características del material. Es por ello que hay que tener especial atención a estas condiciones y en especial a la temperatura de inyección. El tiempo de inyección será para todos los casos de 2 segundos y para la temperatura de inyección será empleada la recomendada por el fabricante. La presión de compactación también será igual para todos los casos y seguirá una distribución constante con el tiempo, es decir, se tratará de una recta de valor 50MPa durante 20 segundos. En la *Figura 6* puede verse lo que acabamos de comentar:

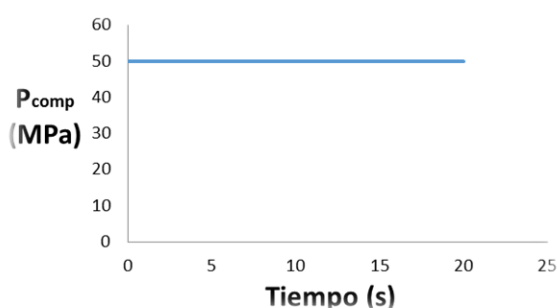


Figura 6. Evolución de la presión de compactación frente al tiempo

En la *Tabla 1* se indican las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales utilizados, sacadas de la propia base de datos de MOLDFLOW, y además se anotan algunas de estas condiciones relacionadas con el proceso de fabricación que se han comentado anteriormente:

<i>Denominación</i>	PP20	PP50	PA20	PA50
<i>Nombre</i>	Hostacom G2U02	Hostacom PF062-5	Durethan BKV 20 FN20	Durethan BKV 50 H20
Propiedades mecánicas				
<i>Modulo de Young (MPa)</i>	3838,95	10192,9	6100	14700
<i>Coeficiente de Poisson</i>	0,44	0,4351	0,313	0,313
Propiedades del proceso de fabricación				
<i>Temperatura de inyección (°C)</i>	230	260	260	290
<i>Temperatura del molde(°C)</i>	40	40	90	100

Tabla 1. Propiedades mecánicas y del proceso de fabricación de cada uno de los materiales

Una vez visto el proceso de fabricación de la pieza, es decir, como ha sido inyectado el material, es hora de realizar un análisis mecánico al componente en cuestión, evaluando todos los posibles casos. Los resultados que nos interesan de este estudio son los relacionados con los desplazamientos y tensiones a la que es sometida la pieza, estando condicionados por toda la información obtenida durante el proceso de fabricación. La modificación de los tres parámetros que hemos visto antes y el valor de todas las propiedades relativas a la inyección del material afectarán al análisis mecánico del componente.

Serán necesarios dos análisis diferenciados del componente: uno aplicando la metodología de trabajo con toda la información de la inyección del material; y otro sin aplicar la metodología de trabajo. Los resultados de estos dos análisis se compararán para ver las diferencias de tener en cuenta los parámetros del proceso de fabricación.

Tanto los resultados del proceso de fabricación como los relacionados al análisis mecánico se verán en detalle en los apartados posteriores.

3.2 Resultados del proceso de fabricación

Se van a comentar los resultados de los distintos casos del proceso de inyección del material en la pieza conseguidos a partir de software MOLDFLOW. Se han estudiado ocho casos diferentes en los que se han variado los parámetros descritos en el apartado anterior (número de entradas, material y porcentaje de fibra).

Para cada una de las simulaciones realizadas el programa nos da una gran cantidad de datos de salida, aunque nos centraremos en destacar los resultados referentes a la presión de inyección, la temperatura del frente de flujo, la fuerza de cierre, la existencia o no de atrapamientos de aire y por último, siendo el más importante de todos, los datos relacionados con la orientación de fibra. Todos y cada uno de estos datos se encuentran en el *Anexo I* de esta memoria. Ahí se muestran cada una de las imágenes obtenidas, explicando en cada caso a que se debe la consecución de esos resultados.

Para este apartado de la memoria se han escogido únicamente los resultados de dos simulaciones para cada uno de los tres criterios que modificamos ya que no es necesario enseñar, para el estudio de cada criterio, todos y cada uno de los resultados de cada caso. Para mostrarlos se han dibujado dos tablas. La primera de ellas (*Tabla 2*) recoge las imágenes del llenado de cada caso mostrado y todos los resultados comentados en el párrafo anterior, excepto la orientación de la fibra, que se encuentra en una tabla aparte (*Tabla 3*).

A continuación se muestran los resultados de la *Tabla 2* y se procederá a su análisis para una mejor comprensión de estos:

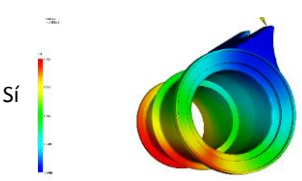
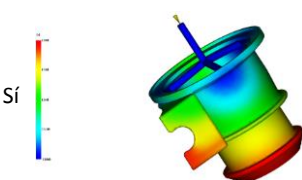
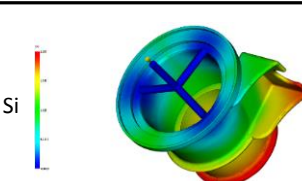
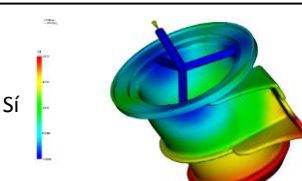
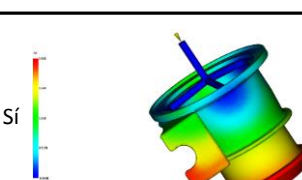
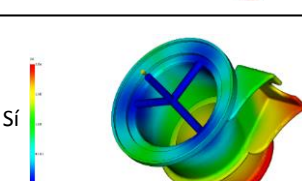
	Llenado	Presión de inyección	Temperatura en el frente de flujo	Fuerza de cierre	Atrapamiento de aire
Número de entradas					
1PP20		9MPa	3°C	2 ton	No
3PP20		8MPa	3°C	1,75 ton	No
Material					
3PP50		10MPa	3°C	2,5 ton	No
3PA50		22MPa	6°C	2,5 ton	No
Porcentaje de fibra					
3PP20		8MPa	3°C	1,75 ton	No
3PP50		10MPa	3°C	2,5 ton	No

Tabla 1. Resultados del proceso de fabricación

Para comentar los diferentes resultados de la *Tabla 2* iremos viendo cómo cada una de las propiedades del estudio han sido alteradas.

- **Llenado:** Todos estos casos tienen en común que su llenado es completo, característica que debemos mirar antes de proceder con el estudio. El llenado debe ser completo ya que sino el material no alcanzaría todas las zonas del molde y por lo tanto, la fabricación de la pieza no sería la correcta. En la *Tabla 2* aparecen algunas fotos del estado final del llenado de la pieza.

- Presión de inyección: Para un mismo tiempo de llenado, la presión que se ejerce al inyectar el material por un orificio es mayor frente a la que es producida al entrar este material por tres entradas, ya que en este segundo caso la cantidad de material a introducir por un mismo orificio se divide. Sin embargo no hay una gran diferencia entre estos valores. Esto es debido a que el largo de la pieza es mayor que el perímetro de la sección circular, por lo que el material tendrá que recorrer más distancia y con ello, se deberá aplicar una mayor presión para finalizar el llenado. Así, con estos dos factores la diferencia presión de inyección entre las diferentes configuraciones se nivela, siendo casi equivalentes. Además, la presión de inyección también aumenta con el cambio de material hacia la poliamida ya que es un material más viscoso. Por último, al incrementar el porcentaje de fibra la presión de inyección también se ve incrementada. Esto es debido a que cuanto mayor sea el número de fibras en una misma cantidad de material este tendrá más densidad, lo que se traduce en una mayor viscosidad.
- Temperatura en el frente de flujo: La variación de temperatura en el frente de flujo se ve alterada ligeramente en el caso de cambiar el material hacia la poliamida (4°C), aunque la mayor diferencia se da cuando se aumenta el porcentaje de fibra de ésta (10°C). Como se ha comentado antes, la poliamida es más viscosa que el polipropileno así que al avanzar el material por la pieza, la fricción entre pieza y material es mayor, lo que provoca un aumento de la temperatura en el frente de flujo. Si a esto le sumamos el aumento del número de fibras, que provocará un incremento de la viscosidad del material, nos dará el valor del salto térmico comentado antes.
- Fuerza de cierre: El valor de la fuerza de cierre es muy bajo en todos los casos estudiados. Teniendo en cuenta que el rango de valores de fuerzas de cierre puede llegar hasta las 8000 toneladas, y con los valores obtenidos para estos componentes, se puede decir que no existen diferencias entre unos casos y otros. Los factores de los que depende la fuerza de cierre son la geometría y posición dentro del molde, que no varían y la presión que es muy similar en todos los casos, por ello los valores de fuerza de cierre no sufren grandes variaciones.
- Atrapamientos de aire: Por último, tal y como podemos observar en los anexos posteriores a esta memoria, no se crean atrapamientos de aire significativos. Es una buena señal, ya que la existencia de estos atrapamientos podría ocasionar la aparición de defectos en la pieza.

No se nos podía olvidar el resultado más importante de todo el proceso de fabricación: la orientación de la fibra en el material. Al trabajar con materiales anisótropos, las propiedades mecánicas que estos poseen se ven alteradas dependiendo de la

orientación de la fibra, lo que es de vital importancia conocer para el diseño de un componente mecánico.

Para ver los resultados miraremos la *Tabla 3*, en la que la manera de proceder ha sido la misma que en la tabla anterior pero con la diferencia que en esta únicamente aparecen los datos relevantes al tensor de orientación de fibra. Los valores que toma este tensor van de 0 a 1, siendo cuanto más alto este valor para cada componente más elevada la probabilidad de que las fibras se encuentren alineadas con respecto a esa dirección.

En la parte derecha de la tabla se puede apreciar una serie de imágenes de la pieza con diferentes colores y a su izquierda el valor máximo que alcanza el tensor de fibra. Estos colores nos muestran gráficamente la probabilidad de que la fibra se encuentre alineada. Cuanto más rojizo sea el color de una parte de la pieza, más alto será el valor y por lo tanto existirá una probabilidad más elevada.


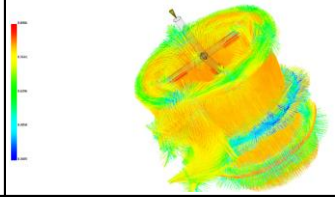
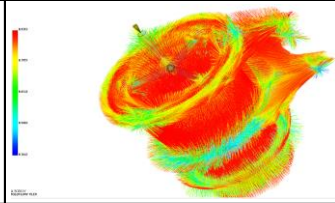
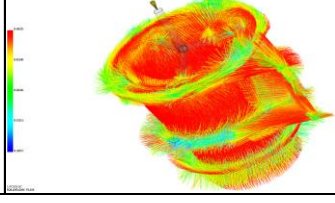
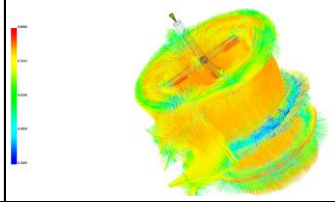
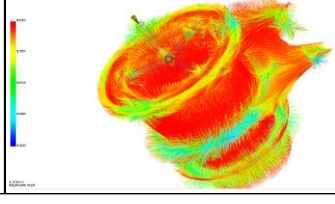
Número de entradas	1PP20	Valor max: 0,9	
	3PP20	Valor max: 0,9	
Material	3PP50	Valor max: 0,94	
	3PA50	Valor max: 0,96	
Porcentaje de fibra	3PP20	Valor max: 0,9	
	3PP50	Valor max: 0,94	

Tabla 2. Resultados de la orientación de la fibra

En cuanto a los resultados referentes a la orientación de fibra podemos contemplar que el número de entradas de material afecta en cómo se distribuye la fibra en la pieza ya que el llenado es diferente, pero no podemos afirmar que la probabilidad de que la fibra se encuentre alineada sea distinta. Observando la distribución de colores de la pieza se aprecia que los colores más “fríos” (azul, verde) se encuentran en las zonas de mayor complejidad de llenado, como pueden ser esquinas y anillos exteriores, y en las zonas donde finaliza el llenado, mientras que los colores cálidos (rojo) están en donde podríamos denominar el tubo principal. Todas las imágenes relativas a estos resultados se encuentran en el *Anexo I*, donde se puede ver con más claridad la dirección que toma la fibra en cada modelo.

Por otro lado sí que existe una pequeña variación al cambiar el material a la poliamida, provocando que la fibra se encuentre mejor orientada, debido a que la unión fibra de vidrio-polipropileno es más pobre que con la poliamida.

Sin embargo, el cambio más significativo se produce cuando el porcentaje de fibra en el material aumenta su valor a un 50% frente a un 20%. En este caso la probabilidad sufre un aumento tanto en el color de la imagen, tal y como vemos en la figura, como en el valor. Este cambio puede ser debido a que existe una mayor cantidad de fibra en el material inyectado, por lo que será más fácil que estas estén orientadas respecto a la dirección principal de la pieza.

En el siguiente apartado se verá cómo afectan todos estos resultados al análisis mecánico del componente, lo que permitirá sacar una serie de conclusiones que demostrarán o no la condicionalidad del proceso de fabricación en el comportamiento mecánico.

3.3. Resultados del análisis mecánico

Primero analizaremos la pieza sin tener en cuenta los resultados del proceso de fabricación, para después comparar estos resultados con los del análisis mecánico habiendo introducido toda la metodología de trabajo. Para la realización de ambos análisis utilizaremos el software ABAQUS, con el que haremos una simulación del estado de funcionamiento del componente lo más realista posible, lo que significa que simularemos el funcionamiento en régimen normal de un turbocompresor.

En esta parte de los turbocompresores el aire atraviesa el tubo hacia la atmósfera, lo que provoca que el tubo soporte fuerzas de presión. Esto puede representarse en ABAQUS como una carga interna y uniforme por toda su longitud de valor 0.1MPa, que es el valor que alcanza esta carga en un turbo en régimen normal de funcionamiento. Por otra parte se puede considerar, observando la manera en la que opera este tipo de componentes, que las condiciones de contorno son de una empotramiento por la pinza que sobresale del tubo, tal y como se muestra en la *Figura 7*.

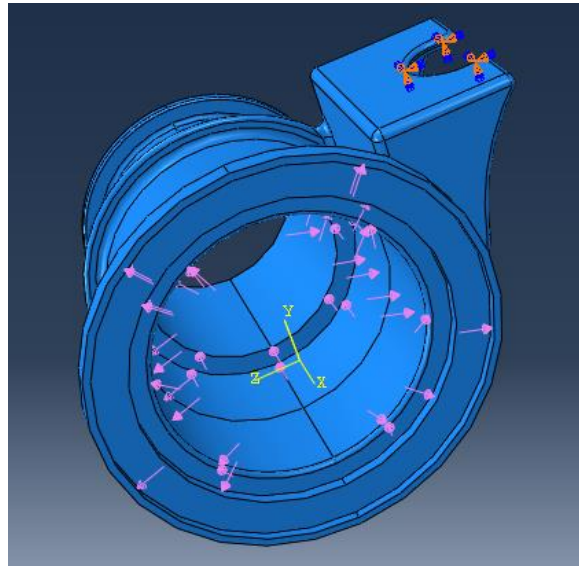


Figura 7. Fuerzas de presión y condiciones de contorno aplicadas a la pieza

En el primer análisis los materiales elegidos no serán exactamente los mismos que los utilizados en MOLDFLOW, sino que consideraremos que se trata de materiales isotropos, frente a los anisótropos que utilizamos en MOLDFLOW. Es decir, estos materiales utilizados no dependerán de la orientación de la fibra y por lo tanto, sus propiedades mecánicas no dependen de la dirección de la que se evalúen, sino que serán constantes para toda la pieza. Es por ello que para la realización de este análisis crearemos en ABAQUS cuatro materiales diferentes a los que les asignaremos las propiedades mencionadas en la *Tabla 1* respectivamente.

En cuanto al análisis aplicando toda la metodología de trabajo, primero será necesario utilizar el software DIGIMAT para poder asignar a cada una de las mallas creadas en el

primer análisis de ABAQUS las mallas del proceso de fabricación de MOLDFLOW de cada una de las configuraciones estudiadas. De esta forma toda la información obtenida durante el proceso de fabricación, y en especial la relativa a la orientación de la fibra, podrá ser utilizada para el estudio mecánico de componente. Una vez transferida toda esta información se procederá al análisis mecánico del componente, estudiando un total de ocho casos distintos atendiendo a los criterios de número de entradas, material y porcentaje de fibra.

Tras ambos análisis se dispondrán de los resultados en tensiones y desplazamientos, tanto numéricos como gráficamente, de forma que podamos apreciar la distribución de estos valores en la pieza. Esta distribución gráfica es la misma para todas las simulaciones realizadas y lo único que cambia son los valores numéricos, así que si mostramos los resultados de uno de los casos nos servirá para hacernos una idea de la distribución de todos los restantes. A continuación se enseña la distribución de la tensión de Von Mises y la de los desplazamientos en la pieza en la *Figura 8*:

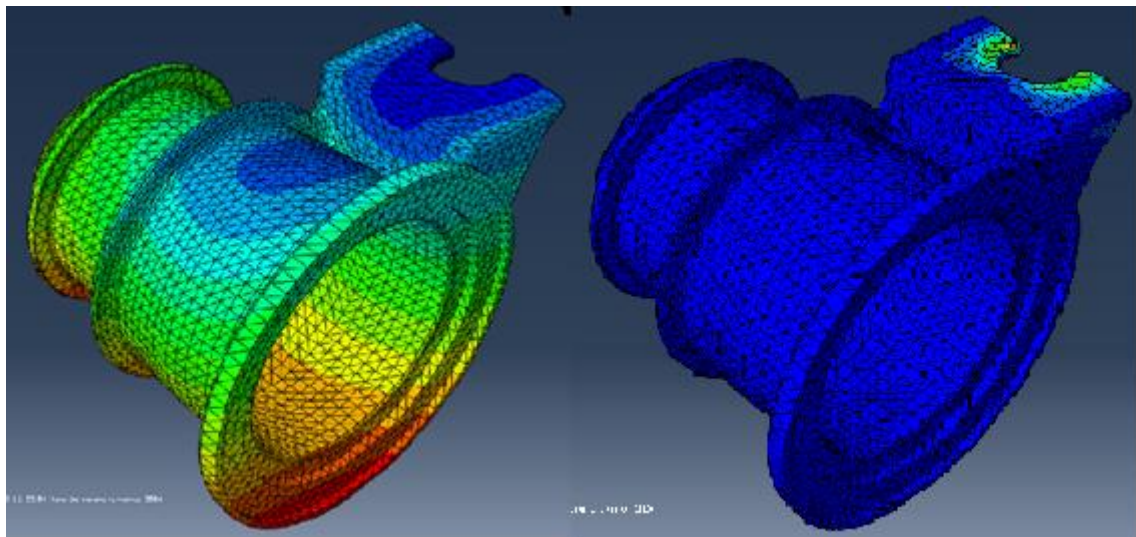


Figura 8. Distribución de los resultados en tensiones (derecha) y desplazamientos (izquierda)

Al hablar de la tensión de Von Mises (derecha) podemos describirla como el valor límite de tensión por el cual se produce el fallo de un material o estructura si en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen rebasa dicho valor. Vemos en la *Figura 8* como los valores máximos (rojo) se encuentran en puntos pertenecientes a la zona donde se agarra la pieza y en esa misma zona el valor de la tensión va disminuyendo hasta alcanzar el mínimo (azul), que se mantiene en el resto de la pieza.

Tras realizar ambos análisis mecánicos, tanto aplicando la metodología como sin aplicarla, vemos que la tensión de Von Mises no sufre variación alguna al pasar de un caso al otro, siendo para todos los casos la tensión máxima igual a 80MPa. Esto se debe a que la tensión de Von Mises no depende del material, del porcentaje de fibra ni

del número de entradas, sino que únicamente depende de la geometría del material, de las cargas que soporta la pieza y de las condiciones de contorno que le son aplicadas, siendo estas últimas tres características iguales para todos los casos.

Si miramos de nuevo a la parte de la tensión de Von Mises de la *Figura 8*, al existir tanta diferencia entre los valores máximos y mínimos no se puede apreciar con claridad la totalidad de los resultados, ya que se encuentra casi toda la pieza del mismo color azul. Es por ello que capturaremos una serie de imágenes en las que se limitará el valor máximo a mostrar de la tensión y así seremos capaces de observar los valores que ésta posee en cada zona de la pieza. Como el valor de esta tensión en cada punto es igual para todos los casos cogeremos uno de ellos y el él señalaremos el valor de la tensión en determinadas zonas:

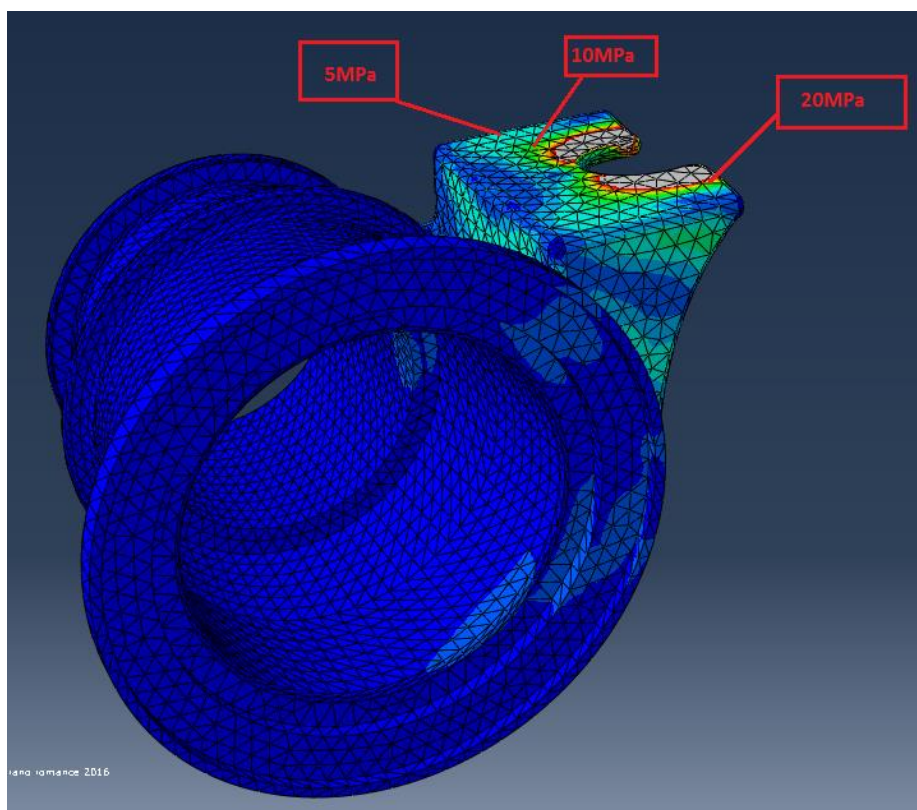


Figura 9 Distribución de tensiones con un valor límite de 20MPa

Con un valor límite de 20MPa, tal y como vemos en la *Figura 9*, se puede apreciar mejor la distribución de la tensión de Von Mises en la pieza, aunque casi únicamente en la zona de la pinza. Ahí hemos marcado tres zonas destacadas: la zona roja correspondería a unos 20MPa, valor máximo para esta imagen; la zona verde serían 10MPa; y una zona azul claro donde la tensión vale unos 5MPa. A partir de esta última zona la tensión iría decayendo hasta llegar a cero, pero esos valores no son apreciables en esta imagen. Es por ello que observaremos la *Figura 10*, donde el límite valor para la tensión es esta vez de 2MPa.

Cabe destacar además la existencia de una zona grisácea. Ahí los valores de tensión se encuentran por encima de los 20MPa que hemos marcado de límite, y es por eso por lo que no aparece coloreada.

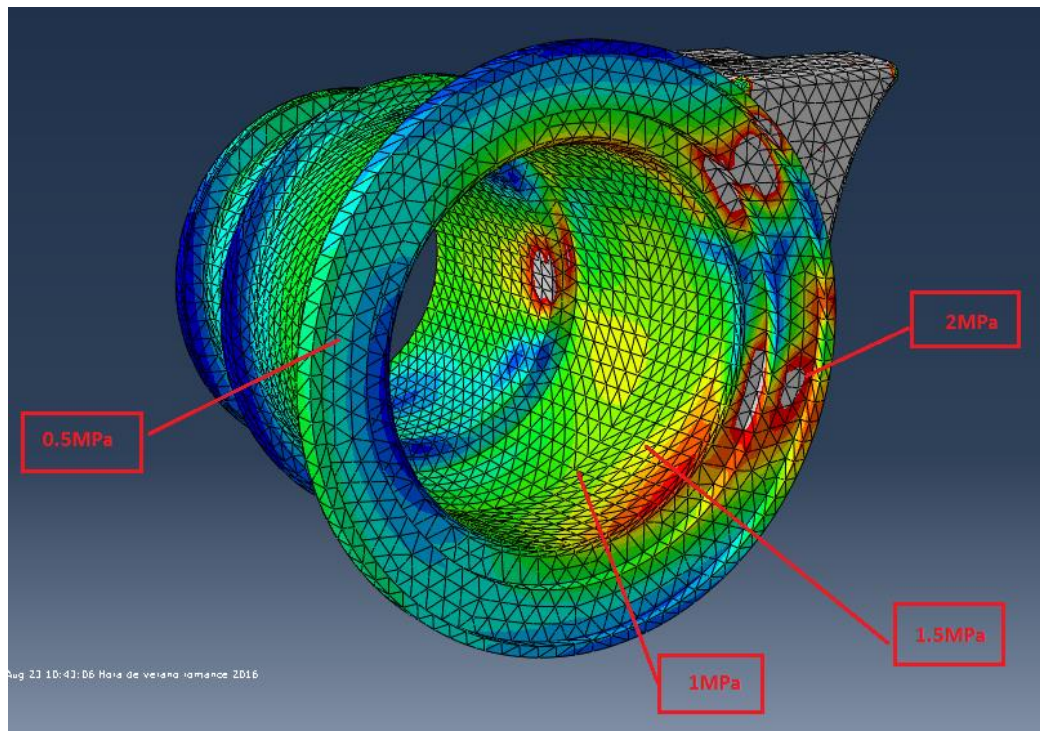


Figura 10 Distribución de tensiones con un valor límite de 2MPa

Ahora que el límite está en 2MPa es mucho más apreciable la distribución de la tensión. Primero, vemos que la zona grisácea ha aumentado de tamaño, abarcando una mayor parte de la pieza, producto de rebajar el límite. En la *Figura 10* están indicadas cuatro zonas dependiendo del color que se trate. Entre un color y otro la tensión variará hasta llegar al siguiente valor, es decir la distribución es gradual, por lo que los valores indicados no serán los mismos siempre para un mismo color, sino que dependerá de su intensidad. Para acabar, las zonas en azul oscuro no se encuentran marcadas debido a que su valor es muy próximo a cero, no siendo necesario volver a bajar la tensión máxima a mostrar.

A continuación, a la izquierda de la *Figura 8* pueden verse los desplazamientos ocasionados en la pieza. Somos capaces de comprobar a simple vista como estos desplazamientos son menores o nulos (azul) en la zona de la pinza ya que ahí se encuentra sujeta la pieza, y como van creciendo gradualmente hasta ser máximos en los extremos inferiores de la pieza (rojo). Esto se puede explicar muy fácilmente: al ser la presión interna y uniforme y al sujetar la pieza por la zona donde se encuentra la pinza, esta sujeción hará que la pieza rote en torno a ese punto donde se encuentra la sujeción, provocando que los mayores desplazamientos se encuentren en los puntos más alejados de este eje de giro.

Al contrario que la tensión, los valores de los desplazamientos sí que dependen del material, de la fibra o del número de entradas. Para ver estos resultados se ha dibujado la *Tabla 4* en la que aparecen los valores máximos de los desplazamientos para cada uno de las simulaciones realizadas. Además se ha añadido una última fila donde se indica la diferencia que existe entre los resultados de ambos análisis.

		1PP20	1PP50	1PA20	1PA50	3PP20	3PP50	3PA20	3PA50
Desplazamiento (mm)	<i>CON Metodología</i>	2,769	1,493	1,517	0,8534	2,732	1,437	1,512	0,8229
	<i>SIN Metodología</i>	1,658	0,628	1,144	0,4501	1,658	0,628	1,144	0,4501
	<i>Diferencia (%)</i>	67,01	137,74	32,60	89,60	64,78	128,82	32,17	82,83

Tabla 3. Resultados de los desplazamientos en el análisis mecánico

A partir de los datos la *Tabla 4* somos capaces de comparar los resultados de desplazamientos entre los diferentes casos, para después comentar la diferencia que existe entre el análisis mecánico con y sin metodología.

- Sin Metodología

Para entender mejor los resultados de este análisis nos fijaremos en las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales del estudio, pues en este caso y al no aplicar la metodología de trabajo, podemos aproximar que estos materiales se comportan como si fuesen isótropos. Esta información, que se encuentra en la *Tabla 1*, nos ayudará a entender mejor el comportamiento mecánico de la pieza.

Los resultados de desplazamientos siguen una tendencia clara dependiendo del módulo de Young: cuanto mayor es éste menor es el desplazamiento sufrido, siendo el PP50 el que menos se deforma tras el análisis mecánico. Tanto el PP20 como el PA20 poseen un gran desplazamiento comparado con los otros dos. Esto es debido a que sus módulos de Young son menores y además los coeficientes de Poisson son superiores, lo que hace que posea una deformación mayor.

- Con Metodología

En este caso también miraremos las propiedades que tiene cada uno de los materiales y además ahora deberemos observar los datos obtenidos del proceso de fabricación relacionados con la orientación de fibra en el material ya que, tal y

como demostraremos en adelante, existe una relación entre ambos resultados. Aunque los materiales con los que trabajamos durante los casos pertenecientes a este análisis son materiales anisótropos y sus propiedades mecánicas son distintas para cada una de las direcciones, podemos observar los valores de la *Tabla 1*, que nos indican el valor del Módulo de Young y Coeficiente de Poisson como si de un material isótropo se tratase.

Ya hemos comentado anteriormente los resultados del análisis mecánico sin aplicar la metodología, por lo que ahora podemos observar esos resultados para compararlos con los que ahora nos atañen. Al igual que para el análisis sin aplicar la metodología, el material sufrirá una mayor deformación cuanto más bajo sea su módulo elástico y mayor su coeficiente de Poisson. La diferencia que notamos frente al anterior análisis, tal y como viene indicado en la última fila de la *Tabla 4*, es que en todos y cada uno de los materiales la deformación es mayor.

Este aumento es mucho más notable cuando se trabaja con un material con un 50% de fibra frente a uno con un 20%. Asimismo, los desplazamientos también se ven incrementados en mayor medida cuando trabajamos con el polipropileno. Si se dan estas de variantes a la vez, como se da en el 1PP50 y el 3PP50, el desplazamiento es más del doble del obtenido sin aplicar la metodología. En nuestra pieza, este valor sobrepasa para ambos modelos el máximo valor de desplazamientos admitidos en la pieza lo que provocará la aparición de defectos o la rotura.

Por último comentar que la diferencia entre configuraciones en el llenado no tiene influencia en los desplazamientos originados.

4. CONCLUSIONES

Una vez vistos e interpretados todos los resultados del trabajo es hora de empezar a sacar conclusiones.

Primero, tal y como hemos ido viendo durante las simulaciones realizadas, el proceso de fabricación tiene una gran importancia dentro del análisis mecánico-estructural de un componente. Si bien es cierto que no afecta a los valores de la tensión de Von Mises ya que no modificamos la geometría de la pieza ni las cargas que soporta, sí que es relevante en el estudio de los desplazamientos, presentando un aumento considerable en todos los casos.

Para el estudio de esta variación en los resultados en desplazamientos se realizaron dos análisis: uno implementando toda la información recopilada en el proceso de fabricación y otro sin aplicar esta metodología. Asimismo, dentro del proceso de fabricación se modificaron tres criterios principales, como son el porcentaje de fibra, la distribución de llenado y el material utilizado. Mirando la influencia que poseen la variación de estos tres criterios en la orientación de fibra del material y los resultados del análisis mecánico en desplazamientos pueden sacarse una serie de conclusiones para cada uno de los criterios comentados:

- Número de entradas

Aquí hemos visto la diferencia entre inyectar el material por medio de una entrada o, por el contrario, a través de tres entradas. En este caso, los desplazamientos no sufren modificación alguna al hacer variar la configuración de llenado.

- Material

Se han comparado los resultados obtenidos con un material compuesto con matriz de polipropileno y otro con matriz de poliamida, ambos con fibra de vidrio. En los casos en los que se utiliza el polipropileno se consiguen mayores desplazamientos que cuando utilizamos la poliamida. Además al aplicar la metodología de trabajo, los desplazamientos en el polipropileno también incrementan en mayor medida su valor. La explicación puede encontrarse en los resultados de la orientación de fibra, ya que para la poliamida la fibra esta mejor orientada que para el polipropileno, y sobre todo teniendo en cuenta que la rigidez (Módulo de Young) del material base polipropileno (3838,95MPa para un 20% fibra y 10192,9MPa para un 50%) es menor que la de la poliamida (6100MPa y 14700MPa).

- Porcentaje de fibra

El porcentaje de fibra estudiado, tanto para la poliamida como para el polipropileno, ha sido del 20% frente al 50%. El añadir un mayor porcentaje de fibra de vidrio al material hace aumentar la resistencia de éste, como puede verse en los valores del módulo de Young y del coeficiente de Poisson. Es por ello que los valores de los desplazamientos para el 20% de fibra sean más elevados. En contra, al aplicar la

metodología estos valores aumentan mucho más para el 50% que para el 20% de fibra. Este contraste se debe a que la fibra se encuentra mejor orientada en el caso del 50%.

En conclusión, el análisis mecánico-estructural depende en gran medida del proceso de fabricación, ya que de esta forma se tienen en cuenta características que nos acercan a los verdaderos desplazamientos que sufre la pieza. Por contra, al no tener en consideración la fabricación de la pieza nos arriesgamos a posibles fallos de funcionamiento o hasta la propia rotura si estos valores de desplazamientos difieren mucho entre un caso y el otro.

Es por ello que en el caso de tener que fabricar una pieza de estas características es crucial una buena elección, tanto del material como del porcentaje de fibra que posea éste. Para la fabricación de nuestra pieza, mirando los desplazamientos, sería recomendable fabricar la pieza con matriz de poliamida y, si es posible, con un 50% de fibra.

5. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El estudio realizado durante este trabajo y todos sus resultados han sido obtenidos únicamente mediante software de simulación. Estos programas son de una gran utilidad cuando se quiere diseñar un componente mecánico, ya que permiten ver su comportamiento y los defectos que puedan aparecer sin tener que fabricar la pieza y por lo tanto, sin gasto económico.

Tras los resultados de este trabajo se debería proceder a la fabricación del componente, eligiendo el material más adecuado para ello, y tras esto a la realización un análisis mecánico-estructural. De esta forma se podrán ver los resultados experimentales y ver si se producen defectos en la pieza.

Nosotros hemos puesto toda nuestra atención en el análisis mecánico-estructural del componente pero podríamos aplicar esta misma metodología de trabajo en otros análisis, como por ejemplo a un análisis térmico de la pieza. También sería posible la realización de ensayos de fatiga o de resistencia ante otro tipo de esfuerzos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **M. Muniesa, J. Escuín, D. Elduque, I. Clavería, C. Javierre, A. Fernández. (2015).** Metodología para la integración de resultados obtenidos del proceso de fabricación en el análisis mecánico-estructural con materiales compuestos perteneciente al II Simposio Internacional CEA de Modelado y Simulación en la Universidad de la Rioja
- [2] **Tecnología de los Plásticos: Materiales compuestos. (2011).** Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/07/materiales-compuestos.html>
- [3] **Master Universitario de Ingeniería Mecánica. (2015).** Diseño de componentes de plástico inyectado con MOLDFLOW.
- [4] **Manual de usuario de MOLDFLOW. (2016).** Disponible en: http://images.autodesk.com/adsk/files/autodesk_navisworks_manage_2012_user_guide_esp.pdf
- [5] **Introducción ABAQUS. (2016).** Disponible en: http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion_abaqus.pdf
- [6] **Guía ABAQUS. (2013).** Disponible en: http://extranet.frsf.utn.edu.ar/application/uploads/GIMNI/archivos/guia_abaqus.pdf
- [7] **Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales. (2015)** Mecánica de sólidos deformables. Práctica 3.
- [8] **Manual de usuario de DIGIMAT (2014)**
- [9] **Interempresas. (2007).** Aplicaciones de poliamida 46 en turbocompresores. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/19035-Aplicaciones-de-poliamida-46-en-turbocompresores.html>
- [10] **Motorpasion.com. (2013).** Sobrealimentación de motores: Turbocompresores. Disponible en: <http://www.motorpasion.com/tecnologia/sobrealimentacion-de-motores-turbocompresores>
- [11] **El blog de endado.com. (2014).** ¿Qué es el turbo del coche y para qué sirve? Disponible en: <http://www.endado.com/blog/que-es-el-turbo-del-coche-y-para-que-sirve/>
- [12] **Autocasión.com. (2014).** Cómo funciona el turbo y los sistemas de sobrealimentación. Disponible en: <http://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/160475/que-es-y-como-funciona-el-turbo-y-los-sistemas-de-sobrealimentacion/>
- [13] **Aficionadosalamecanica.net. (2014).** Motores sobrealimentados, el turbocompresor. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/turbo2.htm>